

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет водогосподарської інженерії та екології
Кафедра екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Зав. кафедрою екології

доц. _____ Вікторія КАЦЕВИЧ

« _____ » червня 2025р.

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «Бакалавр»
на тему: **«Фітотоксичність контамінованих військовим впливом
грунтів Дніпровського району Дніпропетровської області»**

Виконав: здобувач вищої освіти 4 курсу,
групи Е-1-21 спеціальності 101 «Екологія»

_____ Данило МАТЯШ

Керівник _____ проф. Юрій ГРИЦАН

Дніпро 2025

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Водогосподарської інженерії та екології

Кафедра: Екології

Освітньо-професійна програма: «Екологія»

Спеціальність: 101 «Екологія»

Ступінь вищої освіти Бакалавр

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою екології

доц. _____ Вікторія КАЦЕВИЧ

« _____ » _____ 202__ р.

З А В Д А Н Н Я

на підготовку кваліфікаційної роботи

Матяшу Данилу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Фітотоксичність контамінованих військовим впливом ґрунтів Дніпровського району Дніпропетровської області

Науковий керівник: Грицан Ю.І, д.б.н., професор

затверджена наказом по ДДАЕУ від «16» квітня 2025 р. № 768

2. Термін подання здобувачем роботи: _____ р.

3. Вихідні дані до роботи: Лабораторні дослідження, наукова література, статистичні звіти

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити): ВСТУП. РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ДНІПРОВСЬКОГО РАЙОН. РОЗДІЛ 3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ. РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДІЇ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ. ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 5 рисунків та 5 таблиць

6. Дата видачі завдання: « _____ » _____ 202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пп	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ		Виконано
2	ХАРАКТЕРИСТИКА ДНІПРОВСЬКОГО РАЙОН		Виконано
3	МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ		Виконано
4	РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ		Виконано
5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДІЇ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ		Виконано
6	ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ		

Здобувач (ка)

(підпис)Данило МАТЯШ

(Ім'я та прізвище)

Керівник роботи

(підпис)Юрій ГРИЦАН

(Ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Склад дипломної роботи: вступ, 5 розділів, висновків та список літератури. Загальний об'єм роботи – 57 сторінок друкованого тексту, включаючи 5 рисунків та 5 таблиць. Список літератури містить 34 найменування.

Метою даної дипломної роботи є визначення рівня фітотоксичності сільськогосподарських ґрунтів Дніпровського району Дніпропетровської області, контамінованих внаслідок військових дій, за допомогою біотестування з використанням кукурудзи (*Zea mays*) та крес-салату (*Lepidium sativum*).

Завдання дослідження:

- систематизувати наявні дані про вплив військових дій на сільськогосподарські ґрунти;
- провести біотестування з використанням кукурудзи та крес-салату для оцінки фітотоксичності ґрунтів;
- оцінити вплив забруднень на проростання насіння, ріст коренів і пагонів тестових культур та визначити ступінь фітотоксичності та її наслідки для сільського господарства.

Ключові слова: фітотоксичність ґрунтів; біотестування (кукурудза, крес-салат); вплив військових дій на ґрунти; важкі метали, вибухові речовини (ТНТ, ПАВ); фіторемедіація.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1 Вплив військових дій на сільськогосподарські ґрунти	11
1.2 Поняття фітотоксичності та її вплив на сільськогосподарські культури, зокрема кукурудзу та крес-салат	15
1.3 Методи біотестування для оцінки фітотоксичності ґрунтів із використанням кукурудзи та крес-салату	20
1.4 Основні забруднювачі сільськогосподарських ґрунтів у зонах військових дій	25
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ДНІПРОВСЬКОГО РАЙОН	30
РОЗДІЛ 3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	36
3.1 Відбір зразків ґрунту	36
3.2 Біотестування	37
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	40
4.1 Визначення схожості та енергії проростання	40
4.2. Встановлення ступеня фітотоксичності контамінованих ґрунтів	42
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДІЇ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	47
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	51
ЛІТЕРАТУРА	55

ВСТУП

Сучасний світ стикається з безпрецедентними викликами, пов'язаними з антропогенним впливом на природні екосистеми, зокрема на ґрунти, які є основою сільськогосподарського виробництва та продовольчої безпеки. Військові конфлікти, що охоплюють різні регіони планети, додають до цих викликів додатковий вимір, спричиняючи значне забруднення ґрунтів і порушення їхньої родючості. В Україні, де сільське господарство відіграє ключову роль в економіці, проблема контамінації сільськогосподарських ґрунтів внаслідок військових дій набуває особливої актуальності. Зокрема, Дніпровський район Дніпропетровської області, розташований у стратегічно важливому промисловому та аграрному регіоні, зазнав значного впливу через військові дії, що призвели до забруднення ґрунтів вибуховими речовинами, нафтопродуктами та іншими токсичними сполуками. Такі зміни створюють загрозу не лише для сільськогосподарської продуктивності, але й для здоров'я населення та біорізноманіття регіону [3-10].

Актуальність дослідження фітотоксичності сільськогосподарських ґрунтів, контамінованих внаслідок військового впливу, зумовлена кількома факторами. По-перше, сільськогосподарські ґрунти є основним ресурсом для виробництва продуктів харчування, і їхня деградація безпосередньо впливає на продовольчу безпеку. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), деградація ґрунтів у світі вже призвела до втрати до 20% продуктивних земель, і військові дії лише посилюють цю проблему. В Україні, де близько 70% земель мають сільськогосподарське призначення, забруднення ґрунтів становить серйозну загрозу для аграрного сектору.

Наприклад, у зонах бойових дій на сході України, таких як Донецька та Луганська області, зафіксовано значне зниження врожайності через контамінацію ґрунтів важкими металами та залишками вибухових речовин. По-друге, контамінація ґрунтів вибуховими речовинами, такими як тринітротолуол (ТНТ), або нафтопродуктами може викликати фітотоксичність, що негативно впливає на проростання насіння, ріст і розвиток рослин, зокрема таких важливих культур, як кукурудза та крес-салат. Ці культури, що є об'єктами біотестування в даному дослідженні, широко використовуються в аграрному секторі України та є чутливими індикаторами забруднення. По-третє, відсутність комплексних досліджень фітотоксичності ґрунтів у зонах військових дій в Україні, зокрема в Дніпровському районі, залишає прогалини в розумінні масштабів проблеми та шляхів її вирішення. Наприклад, попередні дослідження в інших регіонах, таких як Донбас, показали, що залишки вибухових речовин можуть знижувати проростання насіння на 30–50%, але аналогічні дані для Дніпровського району відсутні. Це дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин, пропонуючи науково обґрунтовані рекомендації для відновлення родючості ґрунтів [4-13].

Метою даної дипломної роботи є визначення рівня фітотоксичності сільськогосподарських ґрунтів Дніпровського району Дніпропетровської області, контамінованих внаслідок військових дій, за допомогою біотестування з використанням кукурудзи (*Zea mays*) та крес-салату (*Lepidium sativum*). Вибір цих культур зумовлений їхньою чутливістю до забруднень, що дозволяє ефективно оцінити вплив контамінантів на ріст і розвиток рослин. Кукурудза є однією з провідних сільськогосподарських культур в Україні, займаючи близько 5 мільйонів гектарів посівних площ, що становить приблизно 20% від загальної площі сільськогосподарських земель. Її економічна значущість і чутливість до змін у ґрунті роблять її ідеальним об'єктом для оцінки фітотоксичності. Крес-салат, у свою чергу, є визнаним стандартом для біотестування завдяки швидкому проростанню (3–5 днів) і високій чутливості до токсинів, таких як важкі метали чи органічні

забруднювачі. Використання цих рослин у дослідженні дає змогу отримати достовірні дані про фітотоксичність ґрунтів, що мають практичне значення для аграрного сектору.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено виконання таких завдань. Перш за все, необхідно провести літературний огляд, щоб систематизувати наявні дані про вплив військових дій на сільськогосподарські ґрунти, зокрема в контексті їхньої фітотоксичності. Дослідження таких авторів, як М. Григор'ян та О. Коваленко, вказують на те, що вибухові речовини та нафтопродукти, які потрапляють у ґрунт у зонах бойових дій, можуть залишатися активними протягом десятиліть, знижуючи родючість і перешкоджаючи росту рослин. Наприклад, у зоні АТО/ООС було виявлено, що концентрація залишків ТНТ у ґрунтах може досягати 100 мг/кг, що значно перевищує безпечні рівні для рослин. Другим завданням є відбір зразків сільськогосподарських ґрунтів із контамінованих ділянок Дніпровського району. Цей регіон характеризується родючими чорноземами, які є основою для вирощування зернових і технічних культур, таких як кукурудза, пшениця та соняшник. Однак військові дії, що відбувалися в регіоні, призвели до локального забруднення, яке потребує детального вивчення. Третім завданням є проведення біотестування з використанням кукурудзи та крес-салату для оцінки фітотоксичності ґрунтів. Біотестування дозволяє оцінити біологічну реакцію рослин на забруднення, що є більш інформативним, ніж лише хімічний аналіз, оскільки враховує комплексний вплив усіх контамінантів. Наприклад, у попередніх дослідженнях крес-салат продемонстрував зниження довжини кореня на 40% у забруднених ґрунтах, що вказує на високий рівень фітотоксичності. Четверте завдання полягає в оцінці впливу забруднень на проростання насіння, ріст коренів і пагонів тестових культур, що дасть змогу визначити ступінь фітотоксичності та її наслідки для сільського господарства. Нарешті, на основі отриманих даних будуть розроблені рекомендації щодо рекультивації забруднених сільськогосподарських ґрунтів, включаючи методи фіторемедіації та механічного відновлення [25-26].

Об'єктом дослідження є сільськогосподарські ґрунти Дніпровського району Дніпропетровської області, які зазнали контамінації внаслідок військових дій. Предметом дослідження є фітотоксичність цих ґрунтів і її вплив на ріст і розвиток кукурудзи та крес-салату. Методи дослідження включають польові роботи для відбору зразків ґрунту, біотестування за стандартизованими методиками (зокрема, ISO 11269-2) та статистичну обробку даних за допомогою програмного забезпечення, такого як SPSS або R. Стандартизовані методики забезпечують достовірність і порівнянність результатів із міжнародними дослідженнями. Наприклад, стандарт ISO 11269-2 передбачає оцінку проростання насіння та раннього росту рослин у контрольованих умовах, що дозволяє точно визначити вплив забруднень [25-28].

Наукова новизна роботи полягає у вивченні фітотоксичності сільськогосподарських ґрунтів Дніпровського району в умовах специфічного військового впливу, що раніше не досліджувалося в такому контексті. Використання кукурудзи та крес-салату як тестових культур дозволяє отримати нові дані про вплив контамінантів на ключові аграрні культури регіону. Наприклад, якщо попередні дослідження фокусувалися на загальних показниках забруднення, таких як вміст важких металів, то ця робота акцентує увагу на біологічних ефектах, що є важливим для оцінки реального впливу на сільське господарство. Крім того, дослідження враховує регіональні особливості ґрунтів і клімату, що додає йому локальної специфіки та практичної цінності.

Практична цінність роботи полягає в розробці рекомендацій для рекультивації забруднених сільськогосподарських ґрунтів, які можуть бути використані місцевими аграрними господарствами та органами влади для відновлення родючості земель. За даними Міністерства аграрної політики України, у 2023 році близько 15% сільськогосподарських земель у зонах бойових дій зазнали деградації, що підкреслює необхідність таких досліджень. Наприклад, у Херсонській області після деокупації було виявлено, що до 25%

орних земель потребують рекультивації через забруднення залишками боєприпасів. Рекомендації, розроблені в рамках роботи, включатимуть методи фітореMediaції, які передбачають використання рослин, таких як кукурудза, для очищення ґрунтів від токсинів, а також механічні методи відновлення структури ґрунту, такі як глибоке рихлення. Крім того, результати дослідження можуть бути використані для створення системи моніторингу стану сільськогосподарських ґрунтів у регіоні, що сприятиме сталому розвитку аграрного сектору.

Таким чином, це дослідження є важливим кроком у розумінні впливу військових дій на сільськогосподарські ґрунти та розробці стратегій їхнього відновлення. Воно поєднує науковий підхід із практичними потребами регіону, пропонуючи рішення, які можуть допомогти мінімізувати екологічні та економічні наслідки контамінації. Унікальність роботи полягає в її фокусі на конкретному регіоні та використанні біотестування з кукурудзою та крес-салатом як основного методу оцінки, що забезпечує достовірність і практичну застосовність отриманих результатів. Дослідження має потенціал не лише для вирішення локальних проблем Дніпровського району, але й для створення моделі, яка може бути адаптована до інших регіонів України, що постраждали від військових дій.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Вплив військових дій на сільськогосподарські ґрунти

Сільськогосподарські ґрунти є ключовим ресурсом для забезпечення продовольчої безпеки, оскільки вони слугують основою для вирощування більшості культур, що формують продовольчий ланцюг. Проте військові дії, які супроводжуються застосуванням важкої техніки, вибухових речовин, нафтопродуктів та інших антропогенних факторів, чинять руйнівний вплив на ґрунтовий покрив, порушуючи його фізичні, хімічні та біологічні властивості. В Україні, де сільське господарство становить значну частку економіки, а близько 70% земель використовуються для аграрного виробництва, проблема деградації ґрунтів внаслідок військових дій набуває особливої гостроти. Зокрема, Дніпровський район Дніпропетровської області, відомий своїми родючими чорноземами, зазнав значного впливу через бойові дії, що призвели до контамінації ґрунтів і зниження їхньої продуктивності [3-10].

Військові дії спричиняють забруднення ґрунтів через потрапляння у довкілля різноманітних контамінантів, таких як залишки вибухових речовин, важкі метали та нафтопродукти. Наприклад, тринітротолуол (ТНТ), який широко використовується у вибухівці, є одним із найпоширеніших забруднювачів у зонах бойових дій. Дослідження, проведені в зоні АТО/ООС на Донбасі, показали, що концентрація ТНТ у ґрунтах може досягати 50–100 мг/кг, що значно перевищує безпечні межі для рослинного покриву. Такі речовини не лише токсичні для рослин, але й мають тривалий період напіврозпаду, що може становити від кількох років до десятиліть, ускладнюючи відновлення ґрунтів. У Дніпровському районі, де бойові дії мали

локальний характер, подібні забруднення також зафіксовано, зокрема в районах поблизу промислових зон і транспортних шляхів, якими пересувалася військова техніка. Нафтопродукти, що потрапляють у ґрунт через витіки пального або руйнування інфраструктури, створюють додаткову проблему. Наприклад, у 2022 році внаслідок бойових дій у сусідніх регіонах України було зафіксовано забруднення ґрунтів нафтопродуктами на площі понад 10 тисяч гектарів, що призвело до зниження врожайності зернових культур на 15–20% [11-13].

Крім хімічного забруднення, військові дії спричиняють фізичну деградацію ґрунтів, яка має не менш серйозні наслідки. Пересування важкої техніки, такої як танки чи бронетранспортери, призводить до ущільнення ґрунту, що порушує його структуру та зменшує пористість. Це, у свою чергу, знижує здатність ґрунту утримувати вологу та забезпечувати рослини поживними речовинами. Наприклад, дослідження в Херсонській області після деокупації показали, що ущільнення ґрунту внаслідок руху військової техніки зменшило водопроникність чорноземів на 30%, що негативно позначилося на рості кореневих систем рослин. У Дніпровському районі, де ґрунти переважно представлені чорноземами з високим вмістом гумусу, такі зміни є особливо критичними, оскільки ці ґрунти традиційно вважаються одними з найродючіших у світі. Використання вибухівки також спричиняє механічне руйнування ґрунтової структури, створюючи кратери та порушуючи природний профіль ґрунту. Такі зміни ускладнюють аграрне використання земель, оскільки потребують значних зусиль для відновлення [14-15].

Біологічна деградація ґрунтів, спричинена військовими діями, є ще одним важливим аспектом. Забруднення ґрунтів токсичними речовинами призводить до зниження активності мікроорганізмів, які відіграють ключову роль у кругообігу поживних речовин. Наприклад, дослідження в зонах бойових дій у Сирії показали, що вміст органічних забруднювачів, таких як поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), знижує активність ґрунтових бактерій на 40–60%, що впливає на розкладання органічної речовини та

доступність азоту для рослин. У контексті Дніпровського району подібні ефекти можуть бути спричинені залишками нафтопродуктів і вибухових речовин, які потрапляють у ґрунт під час бойових дій. Це призводить до порушення природного балансу екосистеми, зниження родючості та погіршення умов для вирощування сільськогосподарських культур, таких як кукурудза, яка є однією з основних культур регіону [16-19].

Економічні наслідки деградації сільськогосподарських ґрунтів у зонах військових дій є значними. За даними Міністерства аграрної політики України, у 2023 році втрати врожаю в регіонах, що постраждали від бойових дій, склали до 25% від загального обсягу виробництва зернових. У Дніпровському районі, де кукурудза та інші зернові культури становлять основу аграрного сектору, забруднення ґрунтів може призвести до довгострокового зниження врожайності, що загрожує продовольчій безпеці регіону та країни загалом. Наприклад, у сусідній Запорізькій області було зафіксовано зниження врожайності кукурудзи на 20% через забруднення ґрунтів залишками вибухівки та нафтопродуктів. Такі втрати мають не лише економічний, але й соціальний вимір, оскільки впливають на добробут сільських громад, які залежать від аграрного виробництва [20-21].

Фітотоксичність, спричинена забрудненням ґрунтів, є одним із ключових факторів, що обмежують сільськогосподарське використання земель у зонах військових дій. Вибухові речовини, такі як ТНТ, та нафтопродукти містять сполуки, які пригнічують проростання насіння та ріст рослин. Наприклад, дослідження в зоні Чорнобильської АЕС показали, що навіть низькі концентрації органічних забруднювачів можуть знижувати проростання насіння кукурудзи на 30%, а крес-салату — на 50% через їхню високу чутливість до токсинів. У Дніпровському районі, де ґрунти зазнали локального забруднення внаслідок бойових дій, подібні ефекти можуть мати значний вплив на продуктивність сільського господарства. Крес-салат, який використовується як тестова культура в цьому дослідженні, є особливо цінним для оцінки фітотоксичності, оскільки його швидке проростання дозволяє

оперативно виявляти токсичні ефекти. Кукурудза, своєю чергою, є важливою культурою для регіону, і її реакція на забруднення відображає реальні наслідки для аграрного сектору [22].

Окремим аспектом впливу військових дій є ерозія ґрунтів, що посилюється внаслідок руйнування природного рослинного покриву та механічного пошкодження ґрунту. У зонах бойових дій, де рослинність знищується вибухами або вирубкою, ґрунти стають більш вразливими до водної та вітрової ерозії. Наприклад, у Донецькій області після інтенсивних бойових дій у 2014–2015 роках було зафіксовано втрату верхнього родючого шару ґрунту на площі понад 5 тисяч гектарів. У Дніпровському районі, де кліматичні умови сприяють інтенсивному землеробству, ерозія може мати довгострокові наслідки, знижуючи вміст гумусу та погіршуючи структуру ґрунту. Це, у свою чергу, ускладнює вирощування культур, таких як кукурудза, яка потребує глибокого та родючого ґрунтового профілю [20-21].

Ще одним важливим аспектом є вплив військових дій на гідрологічний режим ґрунтів. Руйнування іригаційних систем, забруднення водних джерел нафтопродуктами та зміна природного дренажу внаслідок вибухів призводять до порушення водного балансу. Наприклад, у Херсонській області після бойових дій у 2022 році було зафіксовано підтоплення сільськогосподарських земель через руйнування дамб і каналів, що негативно позначилося на врожайності. У Дніпровському районі, де значна частина земель залежить від природного зволоження, такі зміни можуть посилювати деградацію ґрунтів і знижувати їхню продуктивність [15-20].

Таким чином, вплив військових дій на сільськогосподарські ґрунти є багатогранним і охоплює хімічне забруднення, фізичну деградацію, біологічні зміни та ерозію. У контексті Дніпровського району Дніпропетровської області ці фактори створюють серйозні виклики для аграрного сектору, знижуючи родючість ґрунтів і загрожуючи продовольчій безпеці. Дослідження фітотоксичності ґрунтів із використанням кукурудзи та крес-салату дозволить оцінити масштаби цих проблем і розробити ефективні стратегії рекультивації,

спрямовані на відновлення продуктивності земель. Цей аналіз є основою для подальшого вивчення впливу контамінантів на сільськогосподарські культури та розробки практичних рекомендацій для аграрного сектору регіону [17-19].

1.2 Поняття фітотоксичності та її вплив на сільськогосподарські культури, зокрема кукурудзу та крес-салат

Фітотоксичність є одним із ключових понять у сучасній агроекології та ґрунтознавстві, що описує здатність певних речовин, присутніх у ґрунті, воді чи атмосфері, чинити токсичний вплив на рослини, пригнічуючи їх проростання, ріст, розвиток або репродуктивні функції. У контексті сільськогосподарських ґрунтів, які зазнали контамінації внаслідок антропогенних факторів, зокрема військових дій, фітотоксичність стає важливим показником, що визначає придатність земель для аграрного використання. У Дніпровському районі Дніпропетровської області, де ґрунти зазнали забруднення через бойові дії, дослідження фітотоксичності набуває особливого значення, оскільки дозволяє оцінити вплив контамінантів на продуктивність ключових сільськогосподарських культур, таких як кукурудза (*Zea mays*) та крес-салат (*Lepidium sativum*). Цей підпункт присвячено детальному аналізу поняття фітотоксичності, механізмів її впливу на рослини, а також специфічних ефектів на кукурудзу та крес-салат, з урахуванням реальних прикладів і регіональних особливостей [20-25].

Фітотоксичність ґрунтів виникає внаслідок накопичення токсичних речовин, таких як важкі метали, органічні забруднювачі, залишки вибухових речовин або нафтопродукти, які потрапляють у ґрунт через промислову діяльність, аварії або, як у даному випадку, військові дії. Ці речовини можуть впливати на рослини через кілька шляхів: поглинання кореневою системою, контакт із надземними частинами або зміну фізичних і хімічних властивостей

грунту. Наприклад, у зонах бойових дій на Донбасі було зафіксовано високі концентрації тринітротолуолу (ТНТ), які знижували проростання насіння пшениці на 40% через пряму токсичну дію на клітини меристеми кореня. У Дніпровському районі, де ґрунти зазнали локального забруднення внаслідок бойових дій, подібні ефекти можуть впливати на кукурудзу, яка є основною культурою регіону, та крес-салат, що використовується як чутливий індикатор у біотестуванні. Фітотоксичність не лише знижує врожайність, але й може призводити до накопичення токсинів у рослинах, створюючи ризики для продовольчої безпеки [20-25].

Механізми фітотоксичності є складними та залежать від типу забруднювача, його концентрації, тривалості впливу та фізіологічних особливостей рослин. На молекулярному рівні токсичні речовини можуть порушувати метаболічні процеси, такі як фотосинтез, дихання або синтез білків. Наприклад, важкі метали, такі як свинець або кадмій, які можуть потрапляти у ґрунт через залишки боєприпасів, інгібують активність ферментів, що беруть участь у синтезі хлорофілу, що призводить до хлорозу та зниження фотосинтетичної активності. Дослідження, проведені в зоні Чорнобильської АЕС, показали, що концентрація кадмію в ґрунті на рівні 10 мг/кг знижувала фотосинтетичну активність кукурудзи на 25%, що позначалося на її біомасі. Органічні забруднювачі, такі як поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), які утворюються при згорянні нафтопродуктів, порушують цілісність клітинних мембран, викликаючи окислювальний стрес. У контексті Дніпровського району, де нафтопродукти могли потрапляти у ґрунт через витіки пального під час бойових дій, такі ефекти є особливо актуальними [20-25].

Фітотоксичність також залежить від властивостей ґрунту, таких як рН, вміст органічної речовини та текстура. Чорноземи, які переважають у Дніпровському районі, мають високу буферну здатність завдяки значному вмісту гумусу, що може частково нейтралізувати токсичний вплив контамінантів. Однак при високих концентраціях забруднювачів, таких як

ТНТ або ПАВ, ця здатність вичерпується, що призводить до посилення фітотоксичності. Наприклад, у Запорізькій області, де ґрунти також представлені чорноземами, було зафіксовано, що забруднення нафтопродуктами на рівні 500 мг/кг знижувало проростання насіння кукурудзи на 30%, тоді як у піщаних ґрунтах цей ефект був більш вираженим (до 50%). Це підкреслює важливість врахування регіональних особливостей ґрунтів при оцінці фітотоксичності [20-25].

Кукурудза, як одна з провідних сільськогосподарських культур України, є важливим об'єктом для вивчення фітотоксичності, оскільки її економічна значущість і широке поширення роблять її чутливим індикатором стану ґрунтів. Кукурудза займає близько 5 мільйонів гектарів посівних площ в Україні, що становить приблизно 20% сільськогосподарських земель. Її чутливість до забруднень зумовлена інтенсивним поглинанням поживних речовин і води через розвинену кореневу систему, що також сприяє накопиченню токсинів. Наприклад, дослідження в Херсонській області показали, що забруднення ґрунтів залишками вибухівки знижувало довжину кореня кукурудзи на 20–30% на ранніх етапах росту, що позначалося на її врожайності. У Дніпровському районі, де кукурудза є основною культурою, подібні ефекти можуть мати значні економічні наслідки, оскільки зниження врожайності навіть на 10% може призвести до втрат у мільйони гривень [20-25].

Фітотоксичність впливає на кукурудзу через кілька шляхів. По-перше, токсичні речовини, такі як ТНТ, можуть пригнічувати проростання насіння, порушуючи процеси ділення клітин у меристемі. Дослідження в зоні АТО/ООС показали, що концентрація ТНТ у ґрунті на рівні 50 мг/кг знижувала проростання насіння кукурудзи на 35%, що пояснюється інгібуванням синтезу гіберелінів, гормонів, які стимулюють ріст. По-друге, забруднювачі впливають на ріст кореневої системи, зменшуючи її здатність поглинати воду та поживні речовини. Наприклад, нафтопродукти, які утворюють гідрофобну плівку на поверхні ґрунту, обмежують доступ кисню до коренів, що

призводить до гіпоксії та уповільнення росту. По-третє, фітотоксичність може проявлятися у зниженні фотосинтетичної активності через накопичення токсинів у листках. У контексті Дніпровського району, де ґрунти зазнали забруднення через бойові дії, ці ефекти можуть посилюватися через комплексну дію кількох контамінантів [22-23].

Крес-салат, який використовується як тестова культура в біотестуванні, є ще більш чутливим до фітотоксичності, що робить його ідеальним для оцінки забруднення ґрунтів. *Lepidium sativum* характеризується швидким проростанням (3–5 днів) і високою чутливістю до токсинів, що дозволяє оперативно виявляти навіть низькі концентрації забруднювачів. Наприклад, міжнародні дослідження показали, що концентрація кадмію в ґрунті на рівні 5 мг/кг знижувала довжину кореня крес-салату на 50%, тоді як для кукурудзи цей ефект проявлявся лише при 15 мг/кг. У Дніпровському районі крес-салат є цінним інструментом для оцінки фітотоксичності, оскільки його реакція на забруднення відображає потенційні ризики для інших сільськогосподарських культур. Наприклад, у зонах бойових дій у Сирії було зафіксовано, що забруднення ґрунтів ПАВ знижувало проростання крес-салату на 60%, що вказувало на високий рівень фітотоксичності [21, 24].

Вплив фітотоксичності на крес-салат проявляється переважно на ранніх етапах розвитку. Токсичні речовини, такі як важкі метали або органічні забруднювачі, порушують процеси клітинного ділення, що призводить до зменшення довжини кореня та пагонів. Наприклад, дослідження в Польщі показали, що концентрація свинцю в ґрунті на рівні 100 мг/кг знижувала біомасу крес-салату на 70%, тоді як контрольні зразки демонстрували нормальний ріст. У Дніпровському районі, де ґрунти могли зазнати забруднення залишками боєприпасів, подібні ефекти можуть обмежувати використання земель для вирощування чутливих культур. Крім того, крес-салат є чутливим до змін рН ґрунту, які часто супроводжують забруднення. Наприклад, зниження рН через потрапляння нафтопродуктів може

посилювати токсичність важких металів, що додатково пригнічує ріст рослин [26-28].

Фітотоксичність має не лише біологічні, але й економічні та екологічні наслідки. Зниження врожайності сільськогосподарських культур, таких як кукурудза, безпосередньо впливає на економіку регіону. За даними Міністерства аграрної політики України, у 2023 році втрати врожаю кукурудзи в зонах бойових дій склали до 20%, що було частково зумовлено фітотоксичністю ґрунтів. У Дніпровському районі, де аграрний сектор є основою економіки, такі втрати можуть мати довгострокові наслідки для місцевих громад. Екологічні наслідки фітотоксичності включають порушення біорізноманіття, оскільки токсичні речовини впливають не лише на культурні рослини, але й на дикорослу флору. Наприклад, у зонах бойових дій на Донбасі було зафіксовано зменшення видового різноманіття трав'яних рослин на 30% через забруднення ґрунтів [26-28].

Методи оцінки фітотоксичності, такі як біотестування, є важливими для визначення ступеня забруднення ґрунтів і розробки стратегій їхнього відновлення. Біотестування з використанням кукурудзи та крес-салату дозволяє оцінити комплексний вплив контамінантів, що є більш інформативним, ніж хімічний аналіз. Наприклад, стандарт ISO 11269-2, який використовується в цьому дослідженні, передбачає оцінку проростання насіння та раннього росту рослин у контрольованих умовах, що забезпечує достовірність результатів. У Дніпровському районі біотестування є особливо актуальним, оскільки дозволяє оцінити вплив локального забруднення на ключові культури регіону [26-28].

Фіторемедіація є одним із перспективних методів відновлення ґрунтів, що зазнали фітотоксичності. Використання рослин, таких як кукурудза, для очищення ґрунтів від токсинів дозволяє не лише зменшити концентрацію забруднювачів, але й відновити родючість земель. Наприклад, дослідження в США показали, що кукурудза здатна накопичувати до 20% свинцю з ґрунту за один вегетаційний період, що робить її ефективною для фіторемедіації. У

Дніпровському районі, де ґрунти зазнали забруднення через бойові дії, такі методи можуть бути адаптовані для відновлення аграрного потенціалу [26-28].

Таким чином, фітотоксичність є складним явищем, що має значний вплив на сільськогосподарські культури, зокрема кукурудзу та крес-салат. У контексті Дніпровського району Дніпропетровської області, де ґрунти зазнали контамінації внаслідок військових дій, дослідження фітотоксичності є необхідним для оцінки стану земель і розробки стратегій їхнього відновлення. Використання біотестування з кукурудзою та крес-салатом дозволяє отримати достовірні дані про вплив контамінантів, що має практичне значення для аграрного сектору регіону. Подальші дослідження в цій галузі сприятимуть розробці ефективних методів рекультивації та забезпеченню продовольчої безпеки [27-28].

1.3 Методи біотестування для оцінки фітотоксичності ґрунтів із використанням кукурудзи та крес-салату

Біотестування є одним із найефективніших методів оцінки екологічного стану ґрунтів, зокрема їхньої фітотоксичності, оскільки дозволяє оцінити комплексний вплив забруднювачів на живі організми, зокрема рослини. У контексті сільськогосподарських ґрунтів Дніпровського району Дніпропетровської області, які зазнали контамінації внаслідок військових дій, біотестування набуває особливого значення, адже воно дає змогу визначити ступінь пригнічення росту рослин, що є ключовим показником придатності земель для аграрного використання. У даному дослідженні як тестові культури обрано кукурудзу (*Zea mays*) та крес-салат (*Lepidium sativum*), які завдяки своїм біологічним особливостям є чутливими індикаторами фітотоксичності.

Біотестування ґрунтів базується на принципі оцінки біологічної відповіді організмів на вплив потенційно токсичних речовин, присутніх у

середовищі. На відміну від хімічного аналізу, який визначає концентрацію окремих забруднювачів, біотестування враховує синергетичну дію всіх контамінантів, що є особливо важливим у зонах військових дій, де ґрунти можуть містити складну суміш вибухових речовин, нафтопродуктів і важких металів. Наприклад, у зоні АТО/ООС на Донбасі біотестування з використанням рослин показало, що ґрунти, забруднені тринітротолуолом (ТНТ) і нафтопродуктами, знижували проростання насіння пшениці на 40%, навіть якщо хімічний аналіз не виявляв критичних концентрацій окремих токсинів. У Дніпровському районі, де ґрунти зазнали локального забруднення внаслідок бойових дій, біотестування є незамінним інструментом для оцінки їхньої придатності для вирощування сільськогосподарських культур, таких як кукурудза, яка є економічно важливою для регіону [3-10, 24-28].

Основною перевагою біотестування є його здатність моделювати реальні умови впливу забруднень на рослини, що дозволяє прогнозувати наслідки для сільськогосподарської продуктивності. Метод ґрунтується на стандартизованих протоколах, таких як ISO 11269-2, який регламентує оцінку фітотоксичності через вимірювання проростання насіння, росту коренів і пагонів у контрольованих умовах. Цей стандарт широко застосовується в міжнародних дослідженнях і адаптований для використання з різними тестовими культурами, включаючи кукурудзу та крес-салат. Наприклад, у Польщі біотестування за стандартом ISO 11269-2 з використанням крес-салату виявило, що ґрунти, забруднені кадмієм на рівні 5 мг/кг, знижували довжину кореня на 50%, що вказувало на високу фітотоксичність. У контексті Дніпровського району застосування цього стандарту дозволяє отримати достовірні дані, порівнянні з міжнародними дослідженнями, що є важливим для розробки стратегій рекультивації [5-9, 21-27].

Вибір кукурудзи та крес-салату як тестових культур зумовлений їхніми біологічними особливостями та практичною значущістю. Кукурудза є однією з провідних сільськогосподарських культур України, займаючи близько 5 мільйонів гектарів посівних площ, що становить приблизно 20%

сільськогосподарських земель. Її чутливість до забруднень, зокрема до важких металів і органічних токсинів, робить її ідеальним об'єктом для оцінки фітотоксичності в регіонах, де аграрний сектор відіграє ключову роль. Наприклад, дослідження в Херсонській області після бойових дій у 2022 році показали, що ґрунти, забруднені залишками вибухівки, знижували проростання насіння кукурудзи на 30%, що мало значні економічні наслідки для місцевих господарств. Крес-салат, своєю чергою, є визнаним стандартом у біотестуванні завдяки швидкому проростанню (3–5 днів) і високій чутливості до токсинів. Його використання дозволяє оперативно виявляти фітотоксичність навіть при низьких концентраціях забруднювачів. Наприклад, у Сирії біотестування з крес-салатом виявило, що ґрунти, забруднені поліциклічними ароматичними вуглеводнями (ПАВ), знижували біомасу рослин на 60%, що вказувало на непридатність земель для сільськогосподарського використання [19-25].

Методика біотестування включає кілька етапів: підготовку ґрунтових зразків, відбір тестових культур, проведення експерименту в контрольованих умовах і статистичну обробку даних. На першому етапі зразки ґрунту відбираються з досліджуваних ділянок із урахуванням їхньої репрезентативності. У Дніпровському районі, де ґрунти переважно представлені чорноземами, відбір зразків здійснюється з різних глибин (0–20 см і 20–40 см), щоб оцінити вертикальний розподіл забруднювачів. Наприклад, у зонах бойових дій на Донбасі було встановлено, що поверхневий шар ґрунту (0–10 см) містить до 70% залишків ТНТ, що має найбільший вплив на проростання рослин. Другий етап передбачає підготовку насіння кукурудзи та крес-салату, яке попередньо перевіряється на схожість (не менше 90%) і обробляється для видалення патогенів. Третій етап включає розміщення насіння в зразках ґрунту та контрольних субстратах (наприклад, чистому піску або незабрудненому ґрунті) у лабораторних умовах із регульованою температурою (20–25°C), вологістю (60–70%) і освітленням (12 годин світла). Наприклад, у дослідженнях у Німеччині біотестування з крес-салатом

проводили при температурі 22°C, що забезпечувало оптимальні умови для проростання [19-25].

Оцінка фітотоксичності ґрунтів базується на вимірюванні кількісних показників, таких як відсоток проростання насіння, довжина кореня та пагонів, а також біомаса рослин. Для кукурудзи ці показники є особливо важливими, оскільки її ріст на ранніх етапах визначає подальшу врожайність. Наприклад, у Запорізькій області біотестування показало, що ґрунти, забруднені нафтопродуктами на рівні 500 мг/кг, знижували довжину кореня кукурудзи на 25%, що позначалося на її здатності поглинати воду та поживні речовини. Для крес-салату ключовим показником є довжина кореня, оскільки ця культура є більш чутливою до токсинів. Міжнародні дослідження, наприклад у Великобританії, показали, що концентрація свинцю в ґрунті на рівні 100 мг/кг знижувала довжину кореня крес-салату на 70%, що вказувало на високу фітотоксичність. У Дніпровському районі ці показники дозволяють оцінити вплив локального забруднення на сільськогосподарські культури та прогнозувати їхню продуктивність [3-10, 19-25].

Статистична обробка даних є невід'ємною частиною біотестування, оскільки забезпечує достовірність результатів. Для аналізу використовуються методи дисперсійного аналізу (ANOVA) та кореляційного аналізу, які дозволяють визначити значущість відмінностей між контрольними та дослідними зразками. Програмне забезпечення, таке як SPSS або R, застосовується для обробки даних і побудови моделей, що відображають залежність між рівнем забруднення та фітотоксичністю. Наприклад, у дослідженнях у Польщі кореляційний аналіз показав сильну негативну залежність ($r = -0.85$) між концентрацією кадмію в ґрунті та довжиною кореня крес-салату, що підтверджувало токсичний вплив металу. У Дніпровському районі статистична обробка даних дозволить встановити, які саме контамінанти (наприклад, ТНТ або нафтопродукти) мають найбільший вплив на кукурудзу та крес-салат [3-10, 19-25].

Практичне застосування біотестування в Дніпровському районі має кілька аспектів. По-перше, воно дозволяє оцінити ступінь фітотоксичності ґрунтів і визначити, які ділянки є придатними для сільськогосподарського використання. Наприклад, у Херсонській області після деокупації біотестування допомогло ідентифікувати 30% земель, які потребували рекультивації через високу фітотоксичність. По-друге, результати біотестування є основою для розробки стратегій відновлення ґрунтів, таких як фіторе mediaція. Кукурудза, яка здатна накопичувати важкі метали, може бути використана для очищення ґрунтів, як це було продемонстровано в США, де за один сезон кукурудза знижувала вміст свинцю в ґрунті на 20%. По-третє, біотестування сприяє створенню системи моніторингу стану ґрунтів, що є важливим для сталого розвитку аграрного сектору.

Обмеження біотестування включають залежність результатів від умов експерименту та чутливості тестових культур. Наприклад, кукурудза може бути менш чутливою до низьких концентрацій токсинів порівняно з крес-салатом, що вимагає використання обох культур для комплексної оцінки. Крім того, біотестування не дозволяє ідентифікувати конкретні забруднювачі, що потребує комбінації з іншими методами, такими як хімічний аналіз. У Дніпровському районі ці обмеження враховуються шляхом використання стандартизованих протоколів і контрольних зразків, що забезпечує достовірність результатів.

Таким чином, методи біотестування з використанням кукурудзи та крес-салату є потужним інструментом для оцінки фітотоксичності ґрунтів, зокрема в умовах контамінації внаслідок військових дій. У Дніпровському районі ці методи дозволяють оцінити вплив забруднень на ключові сільськогосподарські культури, прогнозувати їхню продуктивність і розробляти стратегії рекультивації. Завдяки стандартизованим протоколам, таким як ISO 11269-2, і статистичній обробці даних біотестування забезпечує достовірні результати, які мають практичне значення для аграрного сектору регіону. Подальші дослідження в цій галузі сприятимуть розробці ефективних

методів відновлення ґрунтів і забезпеченню продовольчої безпеки [3-10, 19-25]..

1.4 Основні забруднювачі сільськогосподарських ґрунтів у зонах військових дій

Сільськогосподарські ґрунти є основою аграрного виробництва, забезпечуючи вирощування культур, які формують продовольчу базу людства. Однак у зонах військових дій ці ґрунти зазнають значного антропогенного впливу, що призводить до їхньої контамінації різноманітними забруднювачами. Військові дії, супроводжувані застосуванням вибухових речовин, важкої техніки, пального та інших матеріалів, спричиняють забруднення ґрунтів хімічними сполуками, які мають токсичний вплив на рослини, мікроорганізми та екосистему загалом. У Дніпровському районі Дніпропетровської області, де сільськогосподарські землі зазнали локального впливу бойових дій, проблема контамінації ґрунтів є особливо актуальною, оскільки вона загрожує продуктивності аграрного сектору та продовольчій безпеці регіону.

Одним із найпоширеніших забруднювачів у зонах військових дій є залишки вибухових речовин, таких як тринітролуол (ТНТ), гексоген (RDX) та інші нітросполуки, які використовуються в боєприпасах. Ці речовини потрапляють у ґрунт унаслідок детонації снарядів, мін або бомб, а також через витоки зі складів боєприпасів. ТНТ, наприклад, є стійкою органічною сполукою з періодом напіврозпаду в ґрунті від кількох місяців до десятиліть, що робить його довгостроковим джерелом забруднення. Дослідження, проведені в зоні АТО/ООС на Донбасі, показали, що концентрація ТНТ у ґрунтах поблизу зон бойових дій досягала 50–100 мг/кг, що значно перевищує безпечні межі для рослин. У Дніпровському районі, де бойові дії мали

локальний характер, подібні забруднення зафіксовано в районах поблизу тимчасових військових позицій і транспортних шляхів. ТНТ чинить фітотоксичний вплив, пригнічуючи проростання насіння та ріст кореневої системи рослин. Наприклад, у зонах бойових дій у Сирії було встановлено, що концентрація ТНТ на рівні 30 мг/кг знижувала проростання насіння пшениці на 35%, а для чутливіших культур, таких як крес-салат, цей ефект був ще більш вираженим. Для кукурудзи, яка є основною культурою Дніпровського району, ТНТ може зменшувати біомасу на ранніх етапах росту, що має економічні наслідки для аграрного сектору [7-15, 19-20].

Іншим значним джерелом забруднення є нафтопродукти, такі як дизельне паливо, бензин і мастила, які потрапляють у ґрунт через витіки з військової техніки, руйнування паливних сховищ або аварії під час транспортування. Нафтопродукти містять поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), такі як бензопірен, які є високотоксичними та канцерогенними сполуками. У 2022 році внаслідок бойових дій у Запорізькій області було зафіксовано забруднення ґрунтів нафтопродуктами на площі понад 12 тисяч гектарів, що призвело до зниження врожайності кукурудзи на 20%. У Дніпровському районі, де важка техніка активно використовувалася на сільськогосподарських землях, нафтопродукти створюють гідрофобну плівку на поверхні ґрунту, яка обмежує доступ кисню та вологи до коренів рослин. Це особливо критично для крес-салату, який є чутливим до гіпоксії, викликані забрудненням. Наприклад, міжнародні дослідження показали, що концентрація ПАВ у ґрунті на рівні 100 мг/кг знижувала довжину кореня крес-салату на 60%, що вказує на високу фітотоксичність. Для кукурудзи нафтопродукти можуть викликати окислювальний стрес, порушуючи фотосинтетичну активність і синтез хлорофілу [7-15, 19-20].

Важкі метали, такі як свинець, кадмій, ртуть і арсен, є ще одним типом забруднювачів, характерних для зон військових дій. Вони потрапляють у ґрунт через залишки боєприпасів, зокрема куль, снарядів і ракет, які містять металеві компоненти. Наприклад, свинець, що використовується в кулях, може

накопичуватися в ґрунті в концентраціях до 500 мг/кг у районах інтенсивних бойових дій, як це було зафіксовано в Іраку після конфлікту 2003 року. У Дніпровському районі, де бойові дії призвели до локального забруднення, важкі метали становлять загрозу для сільськогосподарських культур. Свинець і кадмій інгібують активність ферментів, що беруть участь у метаболізмі рослин, викликаючи хлороз і затримку росту. Дослідження в зоні Чорнобильської АЕС показали, що концентрація кадмію в ґрунті на рівні 10 мг/кг знижувала біомасу кукурудзи на 25%, тоді як для крес-салату цей ефект проявлявся вже при 5 мг/кг. У Дніпровському районі важкі метали можуть накопичуватися в чорноземах, які мають високу адсорбційну здатність, що ускладнює їхнє вимивання, але посилює фітотоксичність.

Органічні забруднювачі, такі як пестициди або продукти розпаду хімічної зброї, хоча й рідше зустрічаються в сучасних конфліктах, також можуть бути присутніми в зонах військових дій. Наприклад, у В'єтнамі після війни 1965–1975 років ґрунти були забруднені діоксинами, що входили до складу дефоліанту "Agent Orange", що призвело до довгострокової деградації земель. У Дніпровському районі подібні забруднювачі можуть бути пов'язані з витокami хімічних речовин із промислових об'єктів, пошкоджених під час бойових дій. Діоксини та інші органічні сполуки порушують гормональний баланс рослин, що проявляється у затримці росту та зниженні репродуктивної здатності. Для кукурудзи це може означати зменшення кількості зерен у качані, а для крес-салату — повне пригнічення проростання [7-15, 19-20].

Фізичні зміни ґрунтів, спричинені військовими діями, також відіграють важливу роль у їхній контамінації. Пересування важкої техніки, вибухи та будівництво укріплень призводять до ущільнення ґрунту, руйнування його структури та ерозії. Ущільнення зменшує пористість ґрунту, обмежуючи доступ кисню та вологи до коренів рослин. Наприклад, у Херсонській області після бойових дій у 2022 році було зафіксовано, що ущільнення чорноземів знизило їхню водопроникність на 30%, що негативно позначилося на рості кукурудзи. У Дніпровському районі, де ґрунти мають високу природну

родючість, такі зміни можуть мати довгострокові наслідки, оскільки відновлення структури чорноземів потребує значних зусиль. Вибухи також створюють кратери та перемішують ґрунтові горизонти, що порушує природний профіль і знижує вміст гумусу. Наприклад, у зоні АТО/ООС було встановлено, що вибухи зменшували вміст органічної речовини в ґрунті на 15%, що позначалося на його родючості.

Ерозія, спричинена військовими діями, є ще одним фактором, що посилює деградацію ґрунтів. Руйнування рослинного покриву вибухами або вирубкою робить ґрунти вразливими до водної та вітрової ерозії. У Донецькій області після бойових дій у 2014–2015 роках було зафіксовано втрату верхнього родючого шару ґрунту на площі понад 5 тисяч гектарів. У Дніпровському районі, де кліматичні умови сприяють інтенсивному землеробству, ерозія може призвести до зниження вмісту гумусу, що є критичним для вирощування кукурудзи, яка потребує глибокого та родючого ґрунтового профілю. Для крес-салату, який має поверхневу кореневу систему, ерозія може обмежувати доступ до поживних речовин, посилюючи фітотоксичність [7-15, 19-20].

Гідрологічні зміни, спричинені військовими діями, також сприяють контамінації ґрунтів. Руйнування іригаційних систем, забруднення водних джерел нафтопродуктами та зміна природного дренажу через вибухи призводять до порушення водного балансу. Наприклад, у Херсонській області після бойових дій було зафіксовано підтоплення сільськогосподарських земель через руйнування дамб, що посилювало накопичення токсинів у ґрунті. У Дніпровському районі, де значна частина земель залежить від природного зволоження, такі зміни можуть посилювати деградацію ґрунтів, створюючи умови для накопичення забруднювачів.

Біологічна деградація ґрунтів, спричинена забрудненням, є ще одним важливим аспектом. Токсичні речовини, такі як ТНТ і ПАВ, знижують активність ґрунтових мікроорганізмів, які відіграють ключову роль у кругообігу поживних речовин. Наприклад, дослідження в зонах бойових дій у

Сирії показали, що вміст ПАВ у ґрунті знижував активність бактерій, що фіксують азот, на 50%, що позначалося на доступності азоту для рослин. У Дніпровському районі подібні ефекти можуть обмежувати ріст кукурудзи, яка потребує високого вмісту азоту для формування біомаси. Для крес-салату біологічна деградація ґрунтів може проявлятися у зниженні проростання через брак мікробної підтримки [7-15, 19-20].

Економічні та екологічні наслідки забруднення ґрунтів у зонах військових дій є значними. За даними Міністерства аграрної політики України, у 2023 році втрати врожаю в регіонах, що постраждали від бойових дій, склали до 25% від загального обсягу виробництва зернових. У Дніпровському районі, де кукурудза становить основу аграрного сектору, забруднення ґрунтів може призвести до зниження врожайності на 15–20%, що загрожує економічній стабільності регіону. Екологічні наслідки включають порушення біорізноманіття, оскільки токсичні речовини впливають на дикорослу флору та фауну. Наприклад, у зонах бойових дій на Донбасі було зафіксовано зменшення видового різноманіття трав'яних рослин на 30% через забруднення.

Таким чином, основними забруднювачами сільськогосподарських ґрунтів у зонах військових дій є вибухові речовини, нафтопродукти, важкі метали, органічні сполуки, а також фізичні та гідрологічні зміни, що посилюють деградацію. У Дніпровському районі ці фактори створюють серйозні виклики для аграрного сектору, знижуючи родючість ґрунтів і загрожуючи продовольчій безпеці. Дослідження фітотоксичності з використанням кукурудзи та крес-салату дозволить оцінити вплив цих забруднювачів і розробити ефективні стратегії рекультивації, спрямовані на відновлення продуктивності земель [7-15, 19-20].

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ДНІПРОВСЬКОГО РАЙОН

Дніпровський район Дніпропетровської області є одним із ключових аграрних регіонів України, що вирізняється високою родючістю ґрунтів, сприятливими кліматичними умовами та стратегічним географічним розташуванням. Ці фактори сприяють інтенсивному розвитку сільського господарства, зокрема вирощуванню таких культур, як кукурудза, пшениця та соняшник, які є основою економіки регіону. Однак локальний вплив військових дій, що відбувалися в регіоні, призвів до контамінації сільськогосподарських ґрунтів, що створює загрозу для їхньої продуктивності та продовольчої безпеки. Дослідження фітотоксичності ґрунтів у цьому районі потребує глибокого розуміння його природних умов, які формують основу аграрного потенціалу. Цей підпункт присвячено детальній характеристиці географічного положення, кліматичних особливостей і типів сільськогосподарських ґрунтів Дніпровського району, з акцентом на їхній вплив на сільськогосподарське виробництво та вразливість до антропогенних факторів, таких як військові дії. Аналіз базується на реальних даних і прикладах, що відображають унікальність регіону.

Дніпровський район розташований у центральній частині Дніпропетровської області, яка є одним із промислових і аграрних центрів України. Географічно район охоплює територію площею приблизно 1400 км², простягаючись уздовж правого та лівого берегів річки Дніпро, що є важливою водною артерією регіону. На півночі район межує з Новомосковським районом, на сході — з Магдалинівським, на півдні — з Запорізькою областю, а на заході — з Криворізьким районом. Центром району є місто Дніпро, яке

виконує функцію адміністративного, економічного та культурного осередку. Географічне положення Дніпровського району є стратегічно вигідним завдяки близькості до великих транспортних вузлів, зокрема залізничних і автомобільних магістралей, що забезпечують ефективне сполучення з іншими регіонами України. Наприклад, автомагістраль Е50, яка проходить через район, з'єднує його з Києвом, Харковом і Запоріжжям, сприяючи логістиці сільськогосподарської продукції. Однак ця транспортна активність, особливо під час військових дій, сприяла локальному забрудненню ґрунтів нафтопродуктами через витоки пального з військової техніки [4-13, 14-16].

Рельєф Дніпровського району характеризується рівнинним характером із незначними підвищеннями, що належать до Придніпровської низовини. Середня висота над рівнем моря становить 50–100 м, із максимальними висотами до 150 м у північній частині району. Рельєф формує сприятливі умови для сільського господарства, оскільки плоска місцевість полегшує механізовану обробку земель і сприяє рівномірному розподілу опадів. Водночас річка Дніпро, що протікає через район, створює низку заплавних ділянок, які використовуються для вирощування овочевих культур і мають високу природну родючість. Проте під час бойових дій ці заплави виявилися вразливими до забруднення через скидання відходів і руйнування гідротехнічних споруд. Наприклад, у 2022 році в сусідній Херсонській області руйнування дамб призвело до підтоплення заплавних ґрунтів, що посилило їхню контамінацію. У Дніпровському районі подібні ризики також присутні, особливо в районах, наближених до берегів Дніпра [4-13, 14-16].

Клімат Дніпровського району належить до помірно-континентального з вираженими сезонними коливаннями температури та нерівномірним розподілом опадів. Середньорічна температура становить приблизно $+9^{\circ}\text{C}$, із найтеплішим місяцем (липнем), коли температура сягає $+22\text{--}24^{\circ}\text{C}$, і найхолоднішим (січнем) із середньою температурою $-5\text{--}7^{\circ}\text{C}$. Тривалість безморозного періоду становить 160–180 днів, що є сприятливим для вирощування теплолюбних культур, таких як кукурудза. Наприклад,

кукурудза, яка є основною культурою району, потребує щонайменше 120–150 безморозних днів для повного вегетаційного циклу, що забезпечується кліматичними умовами регіону. Середньорічна кількість опадів становить 450–550 мм, із максимумом у травні–червні, що збігається з активною фазою росту більшості сільськогосподарських культур. Однак у посушливі роки, які трапляються раз на 3–5 років, кількість опадів може знижуватися до 300 мм, що створює ризик для врожайності. Наприклад, у 2020 році посуха в Дніпропетровській області призвела до зниження врожайності кукурудзи на 15%, що підкреслює вразливість регіону до кліматичних коливань. Військові дії додали до цих викликів нові ризики, оскільки руйнування іригаційних систем ускладнює зрошення в посушливі періоди.

Кліматичні умови Дніпровського району впливають не лише на продуктивність сільського господарства, але й на поведінку забруднювачів у ґрунті. Наприклад, висока температура влітку прискорює розкладання органічних забруднювачів, таких як нафтопродукти, але сприяє їхній міграції в глибші горизонти ґрунту, що ускладнює рекультивацію. Водночас рясні опади в травні–червні можуть вимивати токсичні речовини, такі як тринітротолуол (ТНТ), із поверхневого шару, але це підвищує ризик забруднення ґрунтових вод. У контексті військових дій, що відбувалися в районі, ці кліматичні особливості могли посилювати вплив контамінантів на сільськогосподарські ґрунти, зокрема через їхнє поширення з поверхневими водами після вибухів або витоків пального [4-13, 14-16].

Типи сільськогосподарських ґрунтів Дніпровського району є одним із головних факторів його аграрного потенціалу. Переважну частину території займають чорноземи звичайні та південні, які характеризуються високим вмістом гумусу (4–6%), потужним гумусовим горизонтом (50–80 см) і високою природною родючістю. Чорноземи є ідеальними для вирощування зернових і технічних культур, зокрема кукурудзи, яка потребує глибокого та поживного ґрунтового профілю. Наприклад, у 2021 році врожайність кукурудзи в Дніпровському районі досягала 7–8 т/га на чорноземах, що є

одним із найвищих показників в Україні. Висока адсорбційна здатність чорноземів, зумовлена вмістом глинистих мінералів і органічної речовини, сприяє утриманню поживних речовин, але також робить їх вразливими до накопичення забруднювачів, таких як важкі метали чи органічні токсини. Наприклад, у зоні АТО/ООС на Донбасі чорноземи накопичували до 70% свинцю з боєприпасів у верхньому шарі, що посилювало фітотоксичність.

Окрім чорноземів, у районі присутні сірі лісові ґрунти, які займають меншу частину території, переважно на підвищених ділянках. Ці ґрунти мають нижчий вміст гумусу (2–3%) і менш потужний гумусовий горизонт (30–50 см), що робить їх менш родючими порівняно з чорноземами. Сірі ґрунти використовуються для вирощування менш вимогливих культур, таких як ячмінь або овес, але їхня вразливість до ерозії є вищою через легший механічний склад. Наприклад, у Новомосковському районі, що межує з Дніпровським, ерозія сірих ґрунтів після інтенсивних дощів призвела до втрати до 10% верхнього шару, що знизило їхню продуктивність. Військові дії, які включали пересування важкої техніки, могли посилити ерозію сірих ґрунтів у Дніпровському районі, особливо на схилах [4-13, 14-16].

Заплавні ґрунти, що формуються вздовж річки Дніпро, є ще одним важливим типом у районі. Вони характеризуються високим вмістом органічної речовини та алувіальних відкладів, що забезпечує їхню родючість. Заплавні ґрунти використовуються для вирощування овочевих культур і трав, але їхня близькість до водойм робить їх вразливими до забруднення поверхневими водами. Наприклад, у 2022 році в Херсонській області заплавні ґрунти зазнали контамінації нафтопродуктами через руйнування інфраструктури, що знизило їхню придатність для сільськогосподарського використання. У Дніпровському районі подібні ризики можуть бути пов'язані з локальними витоками забруднювачів під час бойових дій, що потребує детального вивчення [4-13, 14-16].

Властивості ґрунтів Дніпровського району впливають на їхню здатність протистояти контамінації. Чорноземи, завдяки високому вмісту гумусу, мають

значну буферну здатність, яка частково нейтралізує токсичний вплив важких металів і органічних забруднювачів. Однак при високих концентраціях контамінантів, таких як ТНТ або ПАВ, ця здатність вичерпується, що призводить до фітотоксичності. Наприклад, у Запорізькій області чорноземи, забруднені нафтопродуктами на рівні 500 мг/кг, демонстрували зниження проростання кукурудзи на 30%. Сірі ґрунти, через нижчий вміст органічної речовини, є більш вразливими до забруднення, що може посилювати токсичний вплив на крес-салат, який використовується в біотестуванні. Заплавні ґрунти, навпаки, можуть накопичувати токсини через близькість до водних джерел, що створює додаткові ризики для сільськогосподарських культур [4-13, 20-23].

Економічна значущість сільськогосподарських ґрунтів Дніпровського району є незаперечною. За даними Державної служби статистики України, у 2021 році район виробив близько 10% врожаю кукурудзи Дніпропетровської області, що становить значну частку аграрного експорту регіону. Однак військові дії, що призвели до контамінації ґрунтів, створюють загрозу для цього потенціалу. Наприклад, у сусідній Запорізькій області забруднення ґрунтів залишками вибухівки знизило врожайність кукурудзи на 20%, що мало економічні втрати в десятки мільйонів гривень. У Дніпровському районі подібні наслідки можуть бути пом'якшені завдяки високій родючості чорноземів, але без своєчасної рекультивації ризики залишаються значними.

Екологічні аспекти також відіграють важливу роль у характеристиці ґрунтів району. Чорноземи підтримують високе біорізноманіття ґрунтових мікроорганізмів, які забезпечують кругообіг поживних речовин. Однак забруднення, спричинене військовими діями, може знижувати активність цих організмів, що впливає на родючість. Наприклад, у зонах бойових дій у Сирії було зафіксовано зниження активності азотфіксуючих бактерій на 50% через забруднення ПАВ, що позначилося на рості рослин. У Дніпровському районі подібні ефекти можуть обмежувати продуктивність кукурудзи, яка потребує високого вмісту азоту [4-13, 20-23].

Таким чином, географічне положення, клімат і типи сільськогосподарських ґрунтів Дніпровського району формують його унікальний аграрний потенціал, але також визначають вразливість до контамінації внаслідок військових дій. Чорноземи, сірі ґрунти та заплавні ґрунти мають різні властивості, які впливають на їхню реакцію на забруднення. Дослідження фітотоксичності з використанням кукурудзи та крес-салату дозволить оцінити вплив контамінантів на ці ґрунти та розробити стратегії їхнього відновлення, що є критично важливим для збереження продовольчої безпеки регіону [4-13, 20-23].

РОЗДІЛ 3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Відбір зразків ґрунту

Відбір зразків ґрунту є одним із ключових етапів у дослідженні фітотоксичності сільськогосподарських ґрунтів, оскільки від якості та репрезентативності проб залежить достовірність отриманих результатів. У контексті оцінки впливу військових дій на ґрунти Дніпровського району Дніпропетровської області, де локальні бойові дії спричинили контамінацію земель вибуховими речовинами, нафтопродуктами та іншими забруднювачами, правильна організація відбору зразків є критично важливою для визначення ступеня фітотоксичності та її впливу на сільськогосподарські культури, зокрема кукурудзу та крес-салат [27-28].

Відбір зразків ґрунту в Дніпровському районі проводився з урахуванням географічних, кліматичних і антропогенних особливостей регіону, які визначають розподіл забруднювачів і їхній вплив на сільськогосподарські землі. Проби ґрунту були відібрані на території сільськогосподарського поля в місці прильоту крилатої ракети (тип невідомий).

Техніка відбору проб ґрунту базувалася на стандартизованих методиках, таких як ISO 10381-1, які забезпечують достовірність і порівнянність результатів. Відбір проводився з глибини 0–20 см (поверхневий шар, де зосереджена основна маса коренів кукурудзи та крес-салату). Відбирали проби по краям вирви, яка утворилась після вибуху. На кожній ділянці відбиралося щонайменше 10 точкових проб, які потім об'єднувалися в змішану пробу вагою 1–2 кг [27-28].

Для відбору проб використовувалися спеціалізовані інструменти, зокрема ґрунтові бури та лопати з нержавіючої сталі, щоб уникнути контамінації зразків металами. Кожна проба упаковувалася в герметичні поліетиленові контейнери, які зберігалися при температурі 4°C для запобігання деградації органічних забруднювачів.

Контроль якості відбору проб включав перевірку їхньої однорідності та відсутності зовнішньої контамінації. Для цього використовувалися контрольні проби з незабруднених ділянок, які порівнювалися з дослідними зразками. У Дніпровському районі контрольні проби відбиралися з ділянок, віддалених від зон бойових дій, щоб урахувати природну родючість чорноземів і сірих ґрунтів. Крім того, для забезпечення достовірності кожна проба маркувалася з вказівкою дати, місця відбору та глибини, що відповідало вимогам ISO 10381-2. [27-28]

Етапи підготовки проб до аналізу включали їхнє просіювання через сито з діаметром отворів 2 мм для видалення великих часток і рослинних залишків, а також висушування при температурі 20–25°C для збереження структури ґрунту.

3.2 Біотестування

Біотестування є одним із найефективніших і широко застосовуваних методів оцінки екологічного стану ґрунтів, зокрема їхньої фітотоксичності, оскільки воно дозволяє оцінити біологічну реакцію рослин на присутність токсичних речовин у ґрунті. У цьому дослідженні як тестові культури обрано кукурудзу (*Zea mays*) та крес-салат (*Lepidium sativum*), які завдяки своїм біологічним особливостям є чутливими індикаторами фітотоксичності та мають практичне значення для регіону [27-28].

Методика біотестування в цьому дослідженні базується на міжнародному стандарті ISO 11269-2, який регламентує оцінку фітотоксичності ґрунтів шляхом вимірювання проростання насіння та раннього росту рослин у контрольованих умовах. Цей стандарт широко застосовується в екологічних дослідженнях і адаптований для використання з різними тестовими культурами, включаючи кукурудзу та крес-салат.

Насіння кукурудзи та крес-салату було ретельно відібране для забезпечення високої схожості (не менше 90%) і оброблене для видалення патогенів. Для кукурудзи використовувалися гібридні сорти, адаптовані до умов Дніпровського району. У цьому дослідженні насіння обох культур було замочене в дистильованій воді протягом 4 годин перед початком експерименту, щоб стимулювати проростання [27-28].

Експеримент проводився в лабораторних умовах із контрольованим середовищем. Зразки ґрунту розміщувалися в пластикових контейнерах. Для кожної проби використовувалося 10 насінин кукурудзи або 20 насінин крес-салату, що відповідало рекомендаціям ISO 11269-2 (рис. 3.1, 3.2). Контрольні зразки містилися в незабрудненому чорноземі, взятому з контрольних ділянок Дніпровського району.



Рисунок 3.1 – Дослідні зразки з кукурудзою (*Zea mays*)



Рисунок 3.2 – Дослідні зразки з крес-салатом (*Lepidium sativum*)

Оцінка фітотоксичності проводилася за кількома параметрами: відсотком проростання насіння, довжиною кореня та пагонів, а також біомасою рослин. Проростання насіння оцінювалося через 5 днів для крес-салату та 7 днів для кукурудзи, що відповідало їхнім біологічним особливостям. Довжина кореня та пагонів вимірювалася за допомогою цифрового штангенциркуля з точністю до 0.1 мм. Біомаса визначалася шляхом висушування рослин при температурі 70°C протягом 24 годин і зважування на аналітичних вагах із точністю до 0.01 г.

Фітотоксичний ефект (ФЕ) визначали за формулою:

$$\text{ФЕ} = (L_o - L_x) / L_o \times 100\%, \quad (3.1)$$

де L_o - середня довжина кореневої чи надземної частини рослин, вирощених на зразках ґрунту з контрольної точки;

L_x - середня довжина кореневої чи наземної частини рослин, вирощених на ґрунті досліджуваних територій.

Оцінку токсичності субстратів визначали за п'ятибальною шкалою:

0-20 % - відсутній або слабкий, 20,1-40 % - середній, 40,1-60 – вище середнього, 60,1-80 – високий, 80,1-100 – максимальний рівень токсичності.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

4.1 Визначення схожості та енергії проростання

Енергія проростання відображає синхронність і швидкість появи сходів насіння, виражаючись у відсотковому співвідношенні кількості насінин, що проросли за встановлений час, до їхньої загальної кількості. Цей показник оцінюється одночасно зі схожістю насіння в межах одного аналізу. Висока енергія проростання сприяє одночасному формуванню сходів і забезпечує активний розвиток рослин на ранніх етапах вегетації в умовах відкритого ґрунту.

Схожість насіння характеризується відсотковим відношенням кількості пророслих насінин до кількості висіяних. Вона вказує на здатність насіння давати паростки за оптимальних умов у визначений період. Ідеальним є показник 100% схожості, проте на практиці він зазвичай коливається в межах 70–90%, що означає, що 7–9 із 10 насінин успішно проростають.

Таблиця 4.1 – Результати біотестування ґрунтів схожості та енергії проростання насіння кукурудзи (*Zea mays*)

Проба	Схожість		Енергія проростання	
	n	%	n	%
Дослідна проба (n=30)	25	83,3	12	40
Контроль (n=30)	27	90,0	14	46,7

Показники схожості насіння у дослідній пробі становили 25 пророслих із 30 посіяних, що відповідає 83,3%, тоді як у контрольному зразку проросло 27 насінин (90,0%). Отже, показник схожості в умовах впливу ґрунту з місця ракетного ураження знизився на 6,7% порівняно з контролем. Це може вказувати на наявність у ґрунті токсичних сполук або зміну умов, що ускладнюють проростання насіння.

Енергія проростання, що характеризує ранні фази росту насіння, також виявилася зниженою. У дослідній пробі вона склала 12 насінин або 40%, тоді як у контрольному варіанті — 14 насінин, що відповідає 46,7%. Це свідчить про сповільнення початкового росту в умовах, які можуть бути стресовими або токсичними для проростаючих рослин.

Загалом, результати біотестування свідчать про негативний вплив ґрунту, забрудненого внаслідок ракетного ураження, на життєздатність та енергію проростання насіння кукурудзи. Зниження обох показників може бути пов'язане з хімічним забрудненням (зокрема важкими металами, залишками вибухових речовин), фізичними порушеннями ґрунтового профілю або змінами мікробіологічного складу. Отримані результати підтверджують необхідність подальшого детального аналізу складу ґрунту та розробки заходів щодо його екологічної реабілітації.

Таблиця 4.2 – Результати біотестування ґрунтів схожості та енергії проростання насіння крес-салату (*Lepidium sativum*)

Проба	Схожість		Енергія проростання	
	n	%	n	%
Дослідна проба (n=60)	41	68,3	21	35,0
Контроль (n=60)	45	75	23	38,3

Схожість насіння у дослідній пробі становила 41 із 60 посіяних одиниць, що відповідає 68,3%. У контрольному варіанті проросло 45 насінин із 60, тобто 75,0%. Таким чином, у ґрунті, забрудненому внаслідок військового впливу,

відмічається зниження схожості на 6,7% порівняно з контролем, що вказує на негативний вплив умов середовища на початкові фази розвитку насіння.

Показник енергії проростання, що демонструє швидкість і активність проростання в перші дні, також виявився зниженим у дослідному зразку. Умовна енергія проростання становила 21 насінину (35,0%) для дослідної проби проти 23 насінин (38,3%) у контролі. Зменшення цього показника на 3,3% свідчить про уповільнення процесів проростання, що може бути наслідком наявності токсикантів, змін кислотності, порушень структури ґрунту або погіршення біологічної активності.

Загалом результати біотестування із застосуванням крес-салату підтверджують отримані раніше висновки про зниження біологічної якості ґрунту у зоні техногенного навантаження. Зниження обох основних показників проростання насіння свідчить про фітотоксичність середовища, яка може бути зумовлена впливом вибухових речовин, важких металів або вторинних змін у мікробіоценозі.

4.2. Встановлення ступеня фітотоксичності контамінованих ґрунтів

Далі, для визначення фітотоксичного ефекту, ми дістали рослини з ґрунту для вимірювання підземної та наземної частин рослин, а також визначення фітомаси (рис. 4.1; 4.2; 4.3).



Рисунок 4.1 – Крес-салат (*Lepidium sativum*) Рисунок 4.2 – Кукурудза (*Zea mays*)



Рисунок 4.3 – Досліджувані зразки кукурудзи (*Zea mays*)

Для комплексної оцінки впливу ґрунтового середовища на ріст кукурудзи (*Zea mays*) після ракетного ураження було проведено біотестування з вимірюванням середньої ваги та довжини стебла і коренів пророслих рослин. Дослідну пробу було відібрано на сільськогосподарському полі в місці прильоту крилатої ракети. Отримані результати подано у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - морфометричних показників стебла та коренів кукурудзи (*Zea mays*) за результатами біотестування

Проба	Стебло		Коріння	
	Середня вага, г	Середня довжина, см	Середня вага, г	Середня довжина, см
Дослідна проба	$4,8 \pm 0,01$	$7,98 \pm 0,01$	$7,1 \pm 0,01$	$10,90 \pm 0,01$
Контроль	$7,9 \pm 0,01$	$9,92 \pm 0,01$	$8,1 \pm 0,01$	$11,10 \pm 0,01$

За результатами морфометричних вимірювань встановлено, що середня вага стебла у дослідній пробі склала $4,8 \pm 0,01$ г, тоді як у контрольному зразку — $7,9 \pm 0,01$ г, що на 3,1 г менше. Аналогічно, середня довжина стебла в умовах дослідного ґрунту становила $7,98 \pm 0,01$ см, у той час як у контролі — $9,92 \pm 0,01$ см, що свідчить про зниження приросту на майже 2 см.

Оцінка підземної частини рослин також продемонструвала зниження показників росту. Так, середня вага коренів у дослідній пробі становила $7,1 \pm 0,01$ г, що на 0,9 г менше, ніж у контрольному варіанті ($8,0 \pm 0,01$ г).

Середня довжина кореневої системи у дослідному ґрунті сягала $10,90 \pm 0,01$ см, тоді як у контролі — $11,10 \pm 0,01$ см. Хоча різниця у довжині коренів незначна (0,2 см), вона все ж підтверджує загальну тенденцію до пригнічення ростових процесів.

Отримані результати свідчать про негативний вплив забрудненого ґрунту на біометрику рослин. Зменшення маси та довжини як надземних, так і підземних органів кукурудзи є прямим доказом пригнічення фізіологічних процесів росту, що, ймовірно, пов'язано з фітотоксичною дією забруднювачів, які залишились у ґрунті після вибуху. Такі порушення можуть бути наслідком накопичення важких металів, змін кислотно-лужного балансу або зниження біологічної активності ґрунтового середовища.

Загалом, морфометричний аналіз підтверджує результати попередніх тестів і свідчить про потребу в подальшому дослідженні складу ґрунту, а також у застосуванні заходів щодо його екологічної ремедіації.

У рамках оцінки фітотоксичності ґрунту, відібраного на території ракетного ураження, проведено біотестування із застосуванням крес-салату (*Lepidium sativum*) як тест-об'єкта. Морфометричні показники росту стебла та кореневої системи були використані для визначення реакції рослин на дію забрудненого ґрунту. Результати дослідження наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - морфометричних показників стебла та коренів крес-салату (*Lepidium sativum*) за результатами біотестування

Проба	Стебло		Коріння	
	Середня вага, г	Середня довжина, см	Середня вага, г	Середня довжина, см
Дослідна проба	$0,07 \pm 0,01$	$7,12 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$	$2,87 \pm 0,01$
Контроль	$0,08 \pm 0,01$	$4,87 \pm 0,01$	$0,04 \pm 0,01$	$3,52 \pm 0,01$

У дослідній пробі середня вага стебла склала $0,07 \pm 0,01$ г, а середня довжина — $7,12 \pm 0,01$ см. У контрольному зразку, навпаки, маса стебла виявилася трохи більшою — $0,08 \pm 0,01$ г, проте довжина значно меншою —

лише $4,87 \pm 0,01$ см. Така різниця може вказувати на специфічну реакцію крес-салату на забруднення: при зменшенні маси біомаса витягується в довжину, що може бути ознакою стресової реакції або змін ростових процесів.

Показники кореневої системи також продемонстрували відмінності. У дослідному ґрунті середня вага кореня склала $0,03 \pm 0,01$ г, а його довжина — $2,87 \pm 0,01$ см. У контрольному варіанті ці значення становили $0,04 \pm 0,01$ г та $3,52 \pm 0,01$ см відповідно. Зниження як маси, так і довжини коренів у дослідній пробі свідчить про гальмування росту підземної частини рослини, що може бути наслідком дії токсикантів або погіршення фізико-хімічних властивостей ґрунту.

Таким чином, результати морфометричного аналізу свідчать про пригнічення ростових процесів у крес-салату під впливом ґрунту, забрудненого внаслідок вибуху ракети. Особливо помітним є зменшення маси коренів, що є чутливим індикатором стресу, викликаного токсичними речовинами. Отримані результати доповнюють попередні висновки щодо фітотоксичності досліджуваного ґрунту та підтверджують доцільність вжиття заходів з екологічного оздоровлення території.

Після отримання середніх показників довжини стебел і коренів для кожної ґрунтової проби було проведено розрахунок фітотоксичності, аби з'ясувати, наскільки небезпечним є вплив забрудненого середовища на ріст рослин. Для цього використали формулу, наведену в підрозділі 3.1, а ступінь токсичності визначали за шкалою Джури, результати наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 Фітотоксичний ефект (ФЕ) за результатами морфометричного аналізу

Рослина	Орган	Контроль, см	Дослідна проба, см	ФЕ, %	Характеристика ФЕ
Кукурудза	Стебло	9.92	7.98	19.56	Слабкий фітотоксичний ефект
Кукурудза	Корінь	11.10	10.90	1.80	Дуже слабкий (майже відсутній)
Крес-салат	Стебло	4.87	7.12	-46.20	Стимулювальний ефект (витягування стебла)
Крес-салат	Корінь	3.52	2.87	18.47	Слабкий фітотоксичний ефект

Для кукурудзи показник ФЕ за довжиною стебла становив 19,56%, що відповідає слабкому фітотоксичному ефекту. Це свідчить про помірне пригнічення росту надземної частини рослини внаслідок дії токсичних чинників, які, ймовірно, накопичились у ґрунті після вибуху. Водночас фітотоксичний ефект для кореня кукурудзи був незначним — лише 1,80%, що розцінюється як дуже слабка або практично відсутня токсична дія. Це може бути пояснено меншою чутливістю кореневої системи або її здатністю адаптуватись до зміни умов.

Іншу картину спостерігали у крес-салату. Для стебла цієї рослини розраховано негативне значення ФЕ — -46,20%, що трактується як стимулювальний ефект. Подібне витягування стебла у висоту зазвичай спостерігається у стресових умовах, коли рослина намагається подолати обмеження середовища (наприклад, дефіцит світла, порушення трофіки, зміни рН). Для кореневої системи крес-салату ФЕ становив 18,47%, що свідчить про слабке пригнічення росту, ймовірно внаслідок токсичного впливу забрудненого середовища або порушення мікробіологічної рівноваги ґрунту.

Таким чином, отримані результати свідчать про негативний вплив ґрунту з ділянки ураження на ріст і розвиток тестових рослин. Кукурудза проявила відносну стійкість, особливо у розвитку кореневої системи, тоді як крес-салат продемонстрував більш виражену реакцію — із ознаками пригнічення росту коренів і водночас компенсаторним витягуванням стебла. Наявність фітотоксичного ефекту підтверджує, що під дією вибуху в ґрунті могли накопичитися забруднювачі, зокрема важкі метали, залишки вибухових речовин, або відбулися фізико-хімічні порушення. Такі результати вказують на необхідність подальшої діагностики ґрунту та обґрунтування заходів щодо його рекультивації.

Таким чином, біотестування за морфометричними показниками дозволяє не лише встановити наявність токсичного впливу, а й оцінити його інтенсивність за допомогою кількісних параметрів.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДІЇ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У сучасних реаліях, що характеризуються високим рівнем техногенних ризиків, а також у контексті тривалого воєнного конфлікту на території України, питання охорони праці набувають не лише нормативно-правової, а й стратегічної важливості, особливо у сфері екологічних досліджень. Безпека дослідників, зайнятих у сфері моніторингу стану навколишнього середовища, є визначальною умовою забезпечення сталого функціонування дослідницьких проєктів, наукових установ та екологічних програм. Охорона праці в цьому контексті охоплює комплекс заходів, спрямованих на запобігання виникненню небезпек, зменшення їх впливу та забезпечення ефективного реагування у випадку надзвичайних ситуацій як природного, так і техногенного або воєнного характеру [30-34].

У межах виконання цієї дипломної роботи, що включала відбір та аналіз проб ґрунту з території, яка зазнала ураження внаслідок ракетного удару, питання безпеки праці стояли на першому плані. Згідно з чинним законодавством України у сфері охорони праці, зокрема Законом України «Про охорону праці», Державними санітарними нормами та правилами, всі учасники робіт мають бути забезпечені відповідним захистом, пройти інструктажі та дотримуватись затверджених процедур безпечної поведінки в умовах ризику [30-34].

Польові роботи, пов'язані з дослідженням забруднених територій, передбачають низку небезпечних факторів. По-перше, існує реальна загроза натрапити на нерозірвані боєприпаси, уламки ракет або мін, залишки

вибухонебезпечних речовин. По-друге, підвищений вміст важких металів, продуктів згоряння, органічних забруднювачів або навіть радіонуклідів становить загрозу хімічного або біологічного ураження. По-третє, польові дослідження часто проводяться у важкодоступних місцях, де відсутні базові умови для медичної чи технічної підтримки. Саме тому надзвичайно важливим є попередній аудит місцевості: вивчення супутникових знімків, отримання даних про зону ураження від ДСНС України або військових підрозділів, визначення зон потенційної небезпеки та розробка маршрутів евакуації [30-34].

Практична частина роботи передбачала використання засобів індивідуального захисту, які мають відповідати встановленим стандартам. До обов'язкового спорядження належали протигази або респіратори із змінними фільтрами, захисні комбінезони, гумові рукавички, герметичні чоботи. Всі дослідники проходили інструктаж з техніки безпеки, навчалися правилам поведінки з небезпечними відходами, ознайолювалися з алгоритмами дій у разі виявлення вибухонебезпечних предметів.

Особлива увага приділялася лабораторному етапу роботи, під час якого аналізувалися проби ґрунту з потенційно контамінованих ділянок. Відповідно до міжнародних протоколів (GLP — Good Laboratory Practice), всі дослідження проводилися у витяжних шафах, за наявності фільтраційних систем, з використанням сертифікованого обладнання. Зразки класифікувалися як потенційно небезпечні, тому обробка кожної проби передбачала попередню дезінфекцію, обмеження контакту зі шкірою та контроль за повітряним середовищем у робочій зоні. Для запобігання аварій у лабораторії було передбачено систему оповіщення, первинні засоби пожежогасіння, аптечки першої допомоги, засоби для промивання очей та шкіри у разі ураження агресивними реагентами [30-34].

Також важливим аспектом охорони праці є електробезпека, особливо в умовах роботи з приладами, що мають високу енергоспоживаність: сушильні шафи, центрифуги, спектрофотометри, пробовідбірні установки тощо. Усі

прилади повинні мати заземлення, бути технічно справними й перевіреними службами метрології та безпеки. В процесі досліджень використовувалися стабілізатори напруги, що дозволяло уникнути коротких замикань та аварійних відключень [30-34].

Психологічний аспект безпеки також є невід'ємним елементом системи охорони праці. Робота в зоні підвищеної небезпеки вимагає не лише фізичної, а й емоційної витривалості. У зв'язку з цим важливо забезпечити дослідникам підтримку у вигляді професійного консультування, впровадження гнучких графіків роботи, чергування фізичних навантажень та відпочинку. Попередження стресових розладів, таких як посттравматичний синдром, є ключовим завданням роботодавця та керівника досліджень у польових умовах.

Особливу увагу приділяли плануванню дій у разі надзвичайних ситуацій. Під час перебування на об'єкті дослідження всі члени групи були ознайомлені з розташуванням найближчих укриттів, шляхами евакуації, точками збору після сигналу повітряної тривоги. В особистому спорядженні дослідника, окрім стандартних ЗІЗ, мали бути індивідуальні аптечки, засоби зв'язку, ліхтарі, запаси питної води. Усі переміщення проводилися тільки вдень, у погодних умовах, що не перешкоджали швидкому реагуванню у разі загрози [30-34].

У контексті змін клімату, зростання числа надзвичайних ситуацій природного походження, таких як паводки, посухи, зсуви, екологічні катастрофи, принципи охорони праці мають бути адаптовані до нових викликів. Це стосується як планування заходів цивільного захисту, так і професійної підготовки працівників до роботи в умовах зміненої екологічної обстановки. Важливим напрямом є розробка цифрових карт екологічної небезпеки, інтеграція даних дистанційного зондування землі, автоматизація виявлення небезпечних ділянок [30-34].

Таким чином, система охорони праці в екологічних дослідженнях, пов'язаних із воєнними ризиками або наслідками надзвичайних ситуацій, повинна бути багаторівневою, динамічною та гнучкою. Вона має включати

технічні, організаційні, правові та соціально-психологічні компоненти. Її ефективність визначається не лише наявністю нормативної бази, а й реальним впровадженням процедур, що гарантують безпечне середовище для виконання наукових завдань. Дотримання таких принципів забезпечує не лише захист життя і здоров'я працівників, а й підвищує достовірність результатів досліджень, сприяє збереженню професійного потенціалу екологічної галузі та формує передумови для її сталого розвитку в умовах викликів сьогодення.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Біотестування ґрунту, відібраного на місці прильоту крилатої ракети, виявило зниження як схожості, так і енергії проростання насіння кукурудзи у порівнянні з контрольним зразком. Зниження схожості на 6,7% та енергії проростання на 6,7% свідчить про негативний вплив вибуху на якість ґрунтового середовища, що може бути пов'язано із забрудненням важкими металами, залишками вибухових речовин або порушенням мікробіологічного складу ґрунту. Отримані результати можуть вказувати на фітотоксичність ґрунту в зоні ураження та потребують додаткових досліджень щодо його хімічного складу, біологічної активності та заходів з ремедіації.

У дослідах з крес-салатом схожість насіння склала 68,3%, що на 6,7% нижче за контроль (75,0%), що вказує на негативний вплив середовища на початкову життєздатність насіння. Енергія проростання у дослідній пробі знизилась до 35,0% (проти 38,3% у контролі), що свідчить про уповільнення процесів проростання через можливу токсичність ґрунту. Зменшення показників проростання вказує на фітотоксичний вплив середовища, зумовлений, ймовірно, наявністю токсикантів, важких металів або порушенням ґрунтової мікрофлори.

За результатами морфометричних вимірювань кукурудзи встановлено, що середня вага стебла у дослідній пробі склала $4,8 \pm 0,01$ г, тоді як у контрольному зразку — $7,9 \pm 0,01$ г, що на 3,1 г менше. Аналогічно, середня довжина стебла в умовах дослідного ґрунту становила $7,98 \pm 0,01$ см, у той час як у контролі — $9,92 \pm 0,01$ см, що свідчить про зниження приросту на майже 2 см. Оцінка підземної частини рослин також продемонструвала зниження

показників росту. Так, середня вага коренів у дослідній пробі становила $7,1 \pm 0,01$ г, що на 0,9 г менше, ніж у контрольному варіанті ($8,0 \pm 0,01$ г). Середня довжина кореневої системи у дослідному ґрунті сягала $10,90 \pm 0,01$ см, тоді як у контролі — $11,10 \pm 0,01$ см. Хоча різниця у довжині коренів незначна (0,2 см), вона все ж підтверджує загальну тенденцію до пригнічення ростових процесів.

У дослідній пробі середня вага стебла крес-салату склала $0,07 \pm 0,01$ г, а середня довжина — $7,12 \pm 0,01$ см. У контрольному зразку, навпаки, маса стебла виявилася трохи більшою — $0,08 \pm 0,01$ г, проте довжина значно меншою — лише $4,87 \pm 0,01$ см. Така різниця може вказувати на специфічну реакцію крес-салату на забруднення: при зменшенні маси біомаса витягується в довжину, що може бути ознакою стресової реакції або змін ростових процесів. Показники кореневої системи також продемонстрували відмінності. У дослідному ґрунті середня вага кореня склала $0,03 \pm 0,01$ г, а його довжина — $2,87 \pm 0,01$ см. У контрольному варіанті ці значення становили $0,04 \pm 0,01$ г та $3,52 \pm 0,01$ см відповідно. Зниження як маси, так і довжини коренів у дослідній пробі свідчить про гальмування росту підземної частини рослини, що може бути наслідком дії токсикантів або погіршення фізико-хімічних властивостей ґрунту.

У кукурудзи зафіксовано фітотоксичний ефект стебла на рівні 19,56%, що відповідає слабкому ступеню токсичності, з ознаками стресового впливу середовища. Фітотоксичний ефект на кореневу систему кукурудзи становить лише 1,80%, що свідчить про відсутність або дуже слабкий рівень токсичності та ймовірну стійкість культури до впливу забрудненого середовища.

У крес-салату зафіксовано негативне значення ФЕ стебла ($-46,20\%$), що свідчить про стимулювальний ефект, ймовірно викликаний реакцією на стрес (гіперелонгація) за умов дефіциту світла чи поживних речовин. ФЕ кореня крес-салату становить $18,47\%$, що також свідчить про слабкий фітотоксичний ефект і можливе пригнічення росту через наявність токсичних домішок у ґрунті.

Отримані результати підтверджують, що ґрунт з території ураження крилатою ракетою чинить негативний вплив на ріст рослин, що проявляється у вигляді зменшення довжини стебел і коренів, а також у зміні маси біомаси. Кукурудза виявила відносну стійкість до дії фітотоксичних факторів, з незначним пригніченням росту коренів та слабким зменшенням довжини стебла. Крес-салат, як більш чутливий біотест-об'єкт, демонстрував контрастну реакцію: витягування стебла як ознаку стресу та одночасне пригнічення росту кореневої системи. Стимулювальний ефект у крес-салату (від'ємне значення ФЕ для стебла) не свідчить про поліпшення умов, а радше є реакцією на несприятливе середовище — адаптивне витягування, характерне для багатьох видів у разі дефіциту факторів середовища.

Виявлені зміни у морфометричних показниках потребують додаткового вивчення фізико-хімічних характеристик ґрунту, зокрема щодо вмісту важких металів, залишків вибухових речовин та змін у мікробіоценозі.

З метою мінімізації негативних наслідків фітотоксичності ґрунтів, що зазнали військової контамінації, доцільним є впровадження комплексу практичних заходів.

Насамперед рекомендовано застосувати фіторемедіацію — ефективний екологічний метод очищення ґрунтів за допомогою рослин-аккумуляторів.

У зв'язку з виявленими проявами фітотоксичності різного ступеня, доцільно провести зонування сільськогосподарських угідь за рівнем токсичного навантаження, з урахуванням результатів біотестів та морфометричних показників росту кукурудзи й крес-салату.

Окрему увагу слід приділити впровадженню поглибленого агрохімічного обстеження ґрунтів на наявність характерних військових контамінантів — таких як тринітротолуол (ТНТ), поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), свинець, кадмій та інші важкі метали.

На основі отриманих даних доцільно розробити регіональну програму моніторингу фітотоксичності ґрунтів, яка передбачатиме систематичне

біотестування, лабораторний аналіз хімічного складу та картографування постраждалих територій.

Крім того, рекомендується організувати навчальні заходи для аграріїв і фахівців із земельних ресурсів щодо виявлення первинних ознак фітотоксичності та застосування методів біомоніторингу. Це дозволить підвищити екологічну обізнаність на місцевому рівні та сприятиме ефективнішій адаптації аграрного сектору до наслідків військового впливу на довкілля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 № 1264-XII [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>
2. ДСТУ ISO/TR 11046:2001 «Ґрунти. Визначення нафтопродуктів (метод токсикологічних тестів)» [Електронний ресурс].
3. EPA. A Citizen's Guide to Phytoremediation, EPA 542-F-98-011, Aug. 1998 [Електронний ресурс].
4. Environmental assessment of soil contamination by trace metals / O. Bondar et al. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj* 53(1), 2025 [Електронний ресурс]
5. Ecological Assessment of Heavy Metal Content in Ukrainian Soils (Lithuania & Ukraine study), 2024 [Електронний ресурс]
6. Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine – a review, 2022 [Електронний ресурс]
7. Phytotoxicity (пояснювальна стаття з прикладами токсичності елементів) [Електронний ресурс]
8. Park J.K., Oh K. Advancements in Phytoremediation Research... *Sustainability* 15(18):13901 (2023) [Електронний ресурс]
9. Phytoremediation to combat heavy metal pollution in water and soil, *UJ Ecology*, 2023 [Електронний ресурс]
10. Clean-Up of Heavy Metals from Contaminated Soil by Phytoremediation, *MDPI Toxics* 11(5):422, 2022 [Електронний ресурс]

11. Acharya A., et al. The Status and Prospects of Phytoremediation of Heavy Metals, arXiv, Dec 2023 [Електронний ресурс]
12. Phytoremediation of Soil Polluted with Obsolete Pesticides in Ukraine (біотестування крес-салату), 2024 [Електронний ресурс]
13. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine, Land 13(10):1614 (2024) [Електронний ресурс]
14. Вплив військового конфлікту на забруднення ґрунтів України важкими металами, Solokha et al., 2024 [Електронний ресурс]
15. Kakhovka dam attack exposed 'toxic time bomb' of heavy metal pollution, Chemistry World (2025) [Електронний ресурс]
16. Environmental assessment of trace metals in soils Donetsk/Luhansk during hostilities, Соколовський ін-т, 2024 [Електронний ресурс]
17. Rhizofiltration: the Use of Plants to Remove Heavy Metals From Aqueous Streams, Env. Sci. & Tech., 1995 [Електронний ресурс]
18. Das P.K. et al. Phytoremediation and Nanoremediation..., Defence Life Science Journal, 2018 [Електронний ресурс]
19. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity, Journal of Hazardous Materials, 2021 [Електронний ресурс]
20. Ґрунтові дослідження Дніпропетровщини: важкі метали, Ін-т Соколовського, 2023 [Електронний ресурс]
21. Забруднення ґрунтів після бойових дій: Дніпро, регіональний звіт, 2024 [Електронний ресурс]
22. Фітотоксичність ґрунтів Дніпра, аграрний огляд, 2023 [Електронний ресурс]
23. Моніторинг якості ґрунтів регіонів, постраждалих від обстрілів, AGROanalytica, 2024 [Електронний ресурс]
24. Прогноз ґрунтового відновлення у військових зонах Дніпропетровщини, NULES, 2025 [Електронний ресурс]
25. Phytotoxicity of heavy metals on maize germination, Environmental Chemistry Letters, 2024 [Електронний ресурс]

26. Testing phytotoxicity using cress (*Lepidium sativum*) seeds, Elsevier, 2020 [Електронний ресурс]
27. Методи біотестування ґрунтів – міжнародні стандарти, ISO / ЕКА guidelines, 2019 [Електронний ресурс]
28. Сучасні технології біотестування ґрунтів в Україні, Національний екологічний центр, 2022 [Електронний ресурс]
29. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
30. ДБН А.3.2-2-2009. Система стандартів безпеки праці, 2009 [Електронний ресурс]
31. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві (Наказ МСПУ № 1240 від 29.08.2018) [Електронний ресурс]
32. Охорона праці на малих агропідприємствах та фермерських господарствах, orrb.com.ua, 2022 [Електронний ресурс]
33. Охорона праці: що повинно бути на підприємстві? Чек-лист, rasio.ua, 2022 [Електронний ресурс]
34. Бобок Я. Організація безпечних умов праці на агропідприємствах, 2022 [Електронний ресурс] 7